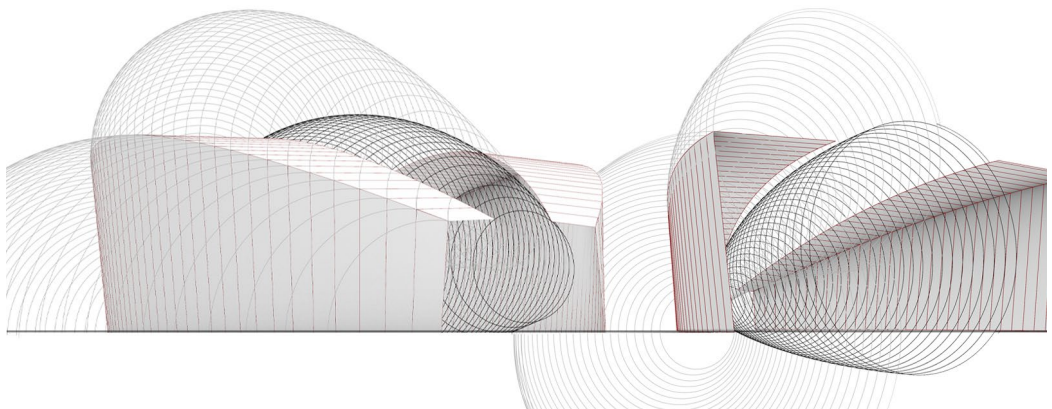
44° Convegno Internazionale
dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione
Congresso della Unione Italiana per il Disegno

Geometrie in movimento nelle architetture cinetiche

Marta Salvatore

Abstract

L'architettura contemporanea ha visto negli ultimi anni un significativo incremento nella progettazione e nella realizzazione di architetture cinetiche. La necessità di modificare la forma di un edificio per rispondere ad esigenze climatiche e funzionali ha alimentato la sperimentazione di diverse specie di movimento. Questa varietà ha portato ad interrogarsi circa il ruolo della geometria della forma nei processi di genesi degli algoritmi che sono alla base del movimento, alimentando una ricerca intorno alle ragioni del cinematismo fondata sull'analisi geometrica di un campione significativo di architetture. Questa lettura critica ha favorito un'ipotesi di classificazione del moto in architettura, che vede nei movimenti rigidi di superfici luogo geometrico un ambito proprio della geometria della forma. Ampio è il repertorio delle architetture cinetiche che rispondono alle leggi della geometria, ma per alcune di queste, alle quali si è voluto dare spazio, le ragioni della forma divengono espressione di un linguaggio architettonico.

Parole chiave
architetture cinetiche, superfici rigate, superfici piegate, architectural geometry, Santiago Calatrava

Algoritmi che generano il movimento. Elaborazione grafica di A. Natale.

doi.org/10.3280/oa-1016-c391

Introduzione

Negli ultimi anni l'architettura contemporanea ha visto una significativa produzione di architetture cinetiche che hanno alimentato un consistente e vario repertorio di modelli. Il movimento, che risponde ad esigenze diverse generalmente climatiche e funzionali, si configura oggi in architettura, come un'occasione di sperimentazione morfologica, capace di esplorare i luoghi della transizione dove opera la mutevolezza della forma in continuo divenire [Zuk, Clark 1970; Musacchio 2009; Schumacher, Vogt, Cordón Krumme 2020].
L'idea di movimento allude ad un concetto tanto seduttivo quanto generico e sfuggente se non sono esplicitate le leggi che lo governano. Le riflessioni che seguono guardano al cinematismo in architettura con gli occhi della geometria, interrogandosi sulle ragioni del moto e sul ruolo che le proprietà geometriche della forma assumono nei processi di genesi delle superfici cinetiche.

Sulle ragioni del movimento

Un'analisi comparativa di un campione significativo di progetti realizzati dalla fine del secolo scorso fino ad oggi ha spinto ad individuare una serie di categorie di movimento alle quali riferire le opere realizzate, nel tentativo di esplorare in maniera ordinata l'ampio repertorio di modelli che consentono oggi l'espressione dei linguaggi cinetici delle architetture contemporanee.
In generale il movimento di un'architettura cinetica può interessare l'involucro esterno dell'edificio oppure riguardare l'intera struttura, risultando in entrambi i casi di tipo elastico oppure rigido.
I movimenti elastici degli involucri riguardano generalmente la deformazione delle membrane esterne, che può essere pneumatica oppure indotta dal movimento della struttura come, riferendosi ad esempi concreti, nel grattacielo Kinetower progettato nel 2011 dal gruppo Kinetura o nel One ocean pavilion realizzato nel 2012 da Soma architecture in Korea del sud [Schumacher, Vogt, Cordón Krumme 2020, pp. 190-191]. Meno diffusi sono invece i casi nei quali il movimento elastico interessa la deformazione complessiva della struttura, che sembrano riguardare principalmente padiglioni e installazioni, come il muro cinetico ΑΝΥΠΑΚΟΗ / Disobedience realizzato da Studio Ini a Londra nel 2018.
Più ampio risulta il repertorio delle architetture dinamiche che rispondono invece a movimenti di tipo rigido. In un movimento rigido, che si intende perciò privo di deformazioni, gli enti mobili rispondono a determinate leggi della geometria, che possono essere dipendenti o indipendenti dalla forma dell'oggetto che si muove. Se i movimenti che non dipendono dalla forma sono generalmente eseguibili tramite traslazioni o rotazioni di intere strutture o parti di esse, quelli che invece dipendono dalla forma trovano ragion d'essere nelle proprietà di classi speciali di superfici luogo geometrico. Sono ascrivibili a questa categoria le superfici piegate e classi speciali di superfici curve e a doppia curvatura. Riferendosi ad applicazioni concrete possiamo riconoscere movimenti rigidi ottenuti per traslazione di elementi singoli nell'involucro della Fosun Foundation di Shangai, progettata da Heatherwick Studio con Foster + Partners e realizzata nel 2017, nella quale i tre elementi sovrapposti traslano gli uni sugli altri ruotando lungo il perimetro dell'edificio (fig. 1a), e ancora nel MegaFace pavilion di Asif Khan realizzato nel 2014 a Sochi, in Russia capace di riprodurre i volti dei passanti traslando orizzontalmente pixel tridimensionali [Schumacher, Vogt, Cordón Krumme 2020, pp. 188-189]. Traslazioni e in particolare rotazioni interessano anche interi organismi edilizi, come il progetto della Dynamic House, progettata in diversi prototipi da DHaus Company, i cui ambienti incernierati fra loro ruotano riconfigurando la casa in funzione dei cambiamenti di stagione (fig. 1b).
Movimenti rigidi ottenuti per piegatura di superfici interessano invece le geometrie che muovono gli origami [Casale, Valenti 2012] e che ne governano la forma tramite rotazione di elementi piani contigui che alterano la morfologia complessiva dell'involucro o della struttura. Rispondono a questo tipo di genesi progetti come quello dell'involucro respon-

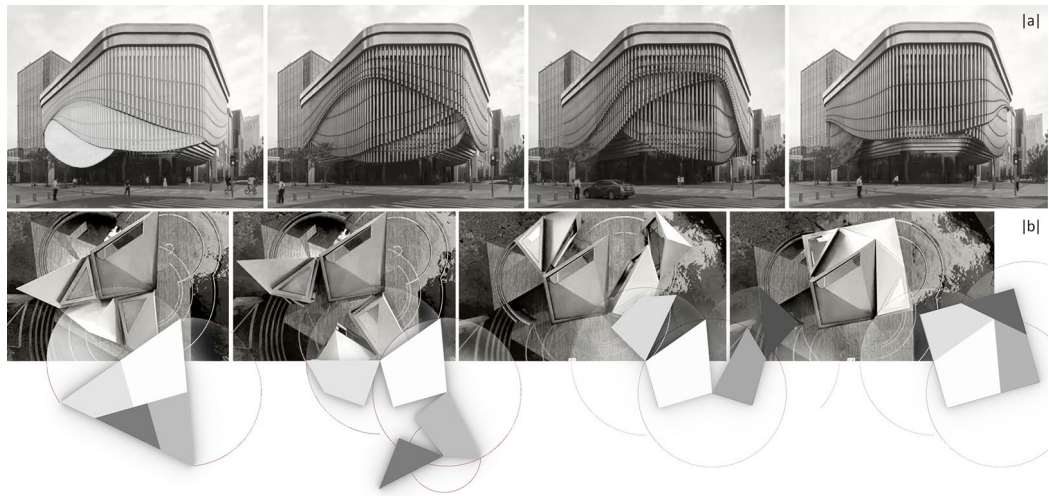



Fig. 1. Movimento di traslazione della facciata della Fosun Foundation (a) e ricostruzione del movimento della Dynamic House sulla base del video di DHaus Company (b). Elaborazione grafica dell'autrice.

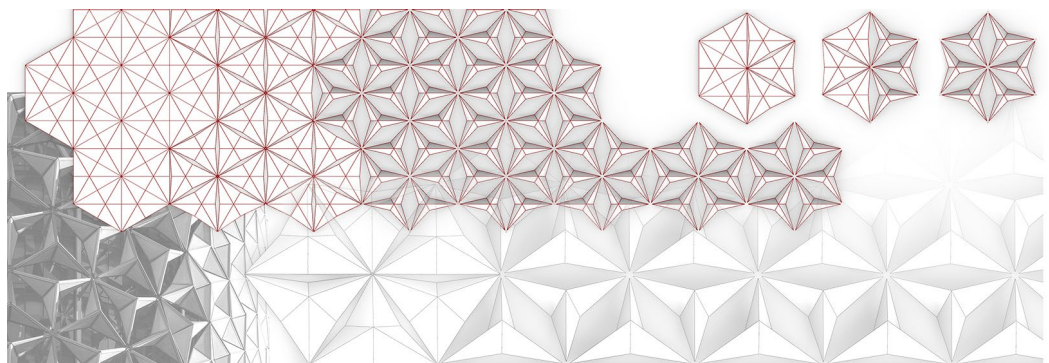



Fig. 2. Ricostruzione delle geometrie alla base delle superfici piegate dell'involucro delle Al Bahr Towers. Elaborazione grafica dell'autrice.

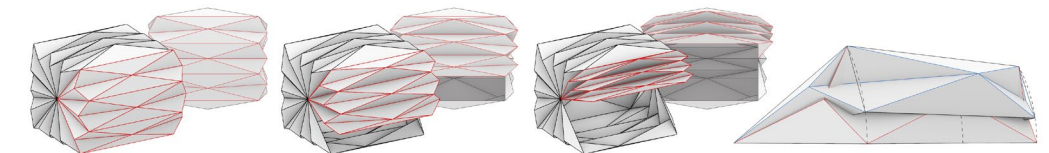
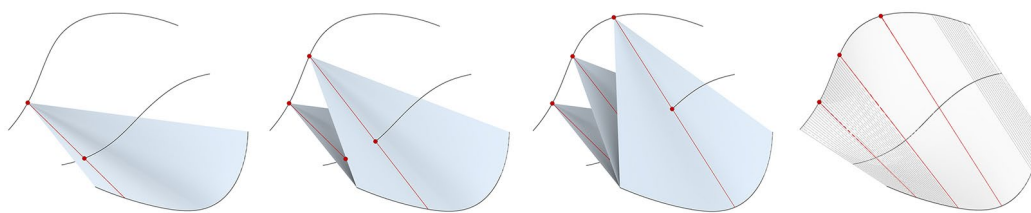



Fig. 3. Ricostruzione delle superfici piegate del Canary Wharf Kiosk. Elaborazione grafica dell'autrice.

sivo delle Al Bahr Towers di Abu Dhabi, progettate da AHR Architects e realizzate nel 2012, composto da elementi triangolari equilateri divisi secondo le rispettive altezze in sei triangoli che, ruotando intorno a queste, generano aperture di ampiezza variabile (fig. 2); lo stesso modello geometrico è anche alla base del movimento delle superfici responsive della Resonant chamber di RVTR. Ancora piegate possono considerarsi le superfici delle terrazze a scomparsa del Cpo De Hallen Noord realizzate tra il 2014 e il 2017 dal Team Hofman Dujardin, o ancora l'involucro del Canary Wharf Kiosk, progettato nel 2013 da Make Architects (fig. 3).
I movimenti rigidi che consentono invece ad una superficie a doppia curvatura di muoversi o ancor più di modificare con continuità la propria forma durante il movimento trovano, come vedremo, ragione geometrica nelle proprietà di alcune classi speciali di superfici luogo geometrico.

Sui 'luoghi' del movimento

In generale una superficie luogo geometrico è immagine di tutte le posizioni che può assumere nello spazio un ente che si muove secondo una determinata legge. Sono espressione di questi 'luoghi' intere classi di superfici che soddisfano determinate condizioni. Fra i luoghi geometrici capaci di muoversi generando trasformazioni continue della forma, un

Fig. 4. Dimostrazione esistenziale delle superfici rigate data da Gaspard Monge. Elaborazione grafica dell'autrice.

ruolo di primo piano spetta alle superfici rigate e, in particolare, alle rigate a piano direttore. Riprodotte in forma discreta da un numero finito di generatrici che gli appartengono queste superfici si materializzano tramite aste mobili capaci di rispondere a diverse esigenze di movimento.
Nella *II Addition à la Géométrie Déscriptive* del 1798, Gaspard Monge descrive la genesi di una rigata sghemba dimostrando come questa si appoggi sempre a tre curve fisse direttrici, delle quali siano note forma e dimensioni [1] (fig. 4).
La geometria di queste direttrici consente di individuare classi speciali di superfici rigate, che differiscono le une dalle altre perché capaci di ammettere tre direttrici curve, due direttrici curve e una rettilinea, una direttrice curva e due rettilinee, tre direttrici rettilinee [2]. Questa classificazione delle rigate secondo la natura e il numero delle loro direttrici più semplici, della quale tratta Gino Fano agli inizi del Novecento [Fano 1910, pp. 347-352], può specializzarsi considerando che le direttrici rettilinee di una rigata possono essere proprie oppure improprie, alimentando così la costruzione di un ampio repertorio di modelli teorici di riferimento, che si possono riconoscere nelle numerose applicazioni che queste superfici hanno trovato e ancora oggi trovano in architettura. L'uso delle rigate accompagna infatti l'attività del costruire dell'uomo sin dall'antichità. La possibilità di riprodurre una superficie a doppia curvatura nello spazio grazie al movimento di un'asta ne semplificava la progettazione e la costruzione, rendendole privilegiate rispetto ad altre.
Fra le diverse classi di superfici rigate, favoriscono il movimento quelle a piano direttore, nelle quali una delle direttrici è una retta impropria e le generatrici, sghembe, si mantengono nel moto tutte parallele a questa giacitura. Seguendo la classificazione proposta da Fano possiamo riconoscere tre tipi di superfici rigate a piano direttore: quelle che ammettono una sola direttrice rettilinea impropria; quelle che ammettono due direttrici rettilinee delle quali una impropria; quelle che ammettono tre direttrici rettilinee delle quali una impropria, configurazione quest'ultima che risponde al solo caso del paraboloide iperbolico (fig. 5).

Sulle architetture cinetiche rigate

Le architetture cinetiche che fanno uso di superfici rigate a piano direttore sono molte, ma soltanto in pochi casi le proprietà geometriche della forma diventano espressione di un linguaggio architettonico. Per questa ragione si è voluto dedicare spazio all'interpretazione delle geometrie rigate alla base dei progetti architettonici che Santiago Calatrava realizza dalla metà degli anni Ottanta del secolo scorso sino ad oggi.

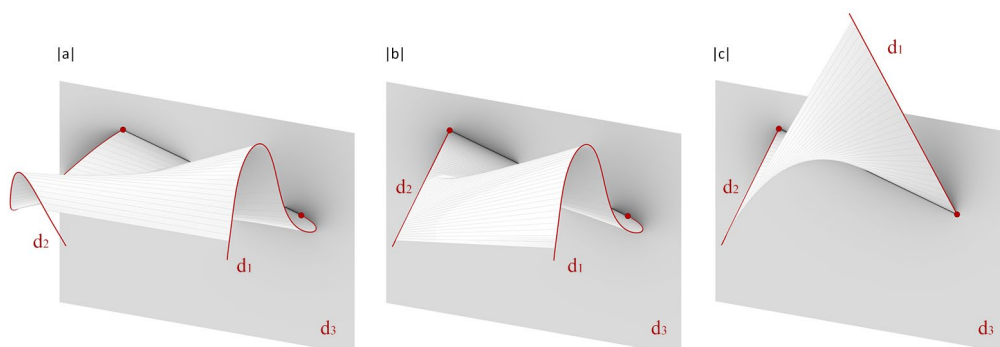



Fig. 5. Superfici rigate a piano direttore che ammettono inoltre come direttrici: due curve (a), una curva e una retta (b), due rette (c). Elaborazione grafica dell'autrice.

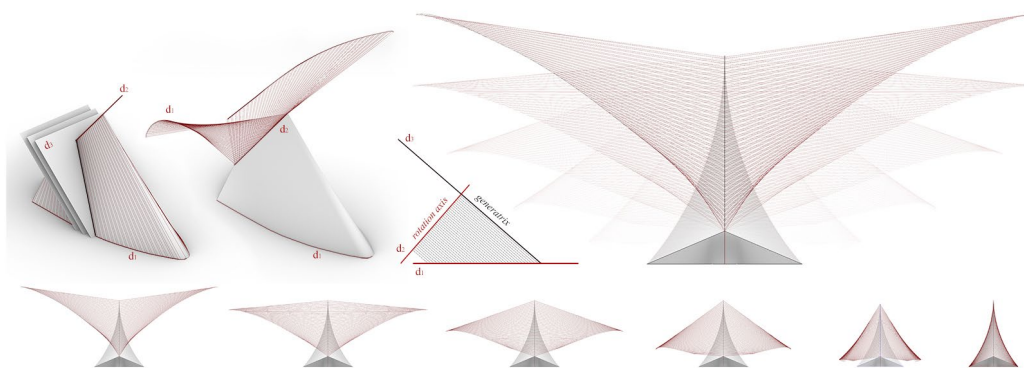
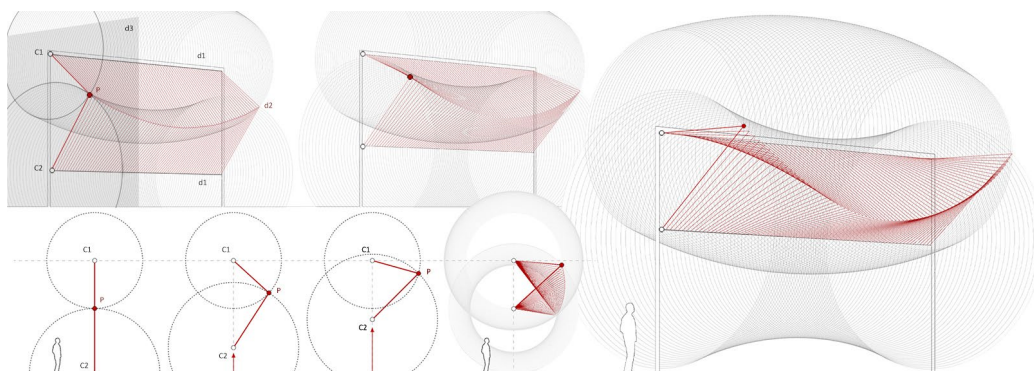
Fig. 6. Ricostruzione delle generatrici e delle direttrici delle rigate a piano direttore delle ali cinetiche del Milwaukee Art Museum. Elaborazione grafica dell'autrice.

Le architetture cinetiche di Calatrava si basano in generale sull'utilizzo di rigate a piano direttore che si appoggiano a due direttrici curve e a un piano direttore appunto (cilindroidi) oppure a una direttrice curva, una retta e un piano direttore (conoidi).
Nel progetto delle ali della copertura del Milwaukee Art Museum (1994-2001) possiamo riconoscere due conoidi a piano direttore, simmetrici, incernierati lungo la direttrice rettilinea d2 (fig. 6). Le generatrici, aste mobili delle ali, sono tutte parallele alla direttrice d3, piano direttore della rigata disposto perpendicolarmente alla direttrice utilizzata come cerniera. Nel caso in questione il movimento interessa l'ala nel suo insieme; le aste che la compongono sono infatti collegate fra loro e, nel moto, le superfici delle ali conservano la medesima forma che assumono nella loro configurazione chiusa. La perpendicolarità fra il piano direttore e la cerniera è necessaria per consentire il movimento della superficie nella sua interezza, senza trasformazioni della geometria.
Un tipo di movimento simile nel quale però la superficie cambia necessariamente forma durante il movimento è proposto da Calatrava nella copertura del Politecnico dell'Università della Florida (2010-2014). Diversamente dal precedente, la rigata si appoggia a due direttrici curve e un piano direttore che non può essere perpendicolare alla direttrice curva adoperata come cerniera. Le aste si muovono perciò indipendentemente le une dalle altre dando forma ad una superficie che, nel moto, cambia costantemente la sua geometria (fig. 7).
La prima architettura cinetica che Calatrava realizza e che può essere considerata prototipo e volano per i progetti successivi è costituita dai Magazzini Ernstings, realizzati a Coesfeld-Latte, in Germania, tra il 1983 e il 1985. Se il movimento delle ali del museo di Milwakee riguarda la rotazione di una sola superficie, l'ala e la sua simmetrica, il progetto dei Magazzini Erstings considera invece il movimento di due superfici incernierate fra loro, inaugurando un modello che sembra declinarsi in diverse varianti nei progetti che seguono. La parte cinetica del progetto riguarda i portali di chiusura dei magazzini, ognuno dei quali è composto da due conoidi a piano direttore. Nella sua configurazione chiusa, ogni portale si compone di due superfici piane realizzate da due schiere di aste verticali contigue incernierate fra loro (fig. 8). Queste sono a loro volta rispettivamente incernierate ad una trave fissa

Fig. 7. A sinistra, le superfici rigate delle ali del Milwaukee Art Museum, foto da Pxfuel. A destra, le ali del Politecnico dell'Università della Florida. Foto di Robert Du Bois, Florida Polytechnic University (CC BY-NC-SA 2.0), flickr.

Fig. 8. Ipotesi ricostruttiva dell'algoritmo generativo del movimento che consente l'apertura del portale dei Magazzini Erstings. Elaborazione grafica di A. Natale.

in sommità e ad una seconda trave mobile, in basso, che consente l'apertura e la chiusura del portale. Quando questa seconda trave viene sollevata le aste ruotano secondo la giacitura del piano direttore, ortogonale alle direttrici rettilinee, generando due superfici rigate la cui forma cambia costantemente in funzione dell'apertura del portale [3]. Se si considera una coppia di aste tipo, è possibile riconoscere l'algoritmo che consente il movimento del portale in una coppia di circonferenze aventi centro rispettivamente sulla trave fissa e sulla trave mobile, e raggio pari alle lunghezze delle aste. Quando il portale si apre, la trave inferiore trasla secondo una direzione verticale e le circonferenze in questione descrivono, nel moto, i luoghi geometrici di tutte le posizioni che possono assumere nello spazio gli estremi condivisi di ogni coppia di aste [4] (fig. 8).
È possibile riconoscere variazioni di questo stesso algoritmo generativo in altri progetti di Calatrava, come la copertura dell'Emergency Services Centre a St. Gallen in Svizzera (1988-1998) o la palpebra dell'Hemisferic della Città delle Arti e della Scienza di Valencia (2005-2009). In questi casi il movimento non è generato da una traslazione ma da una rotazione attorno a un centro, che innesca il movimento della prima asta e di conseguenza dell'intera struttura (figg. 9,10).
Algoritmi simili sono ancora riconoscibili nei progetti della Plaza de Espagña a Siviglia (1992-1995) e della rampa di accesso alla Galleria Pfalzkeller a St. Gallen in Svizzera (1997-1999). In quest'ultimo caso la rigata cinetica apre il portale d'ingresso alla rampa che serve la galleria (fig. 11). Come nel caso dei Magazzini Erstings la configurazione chiusa risulta piana, questa volta orizzontale, rivelando la curvatura della superficie non appena l'arco di faccia ruota per aprire il passaggio. Immaginando la configurazione chiusa del portale, possiamo

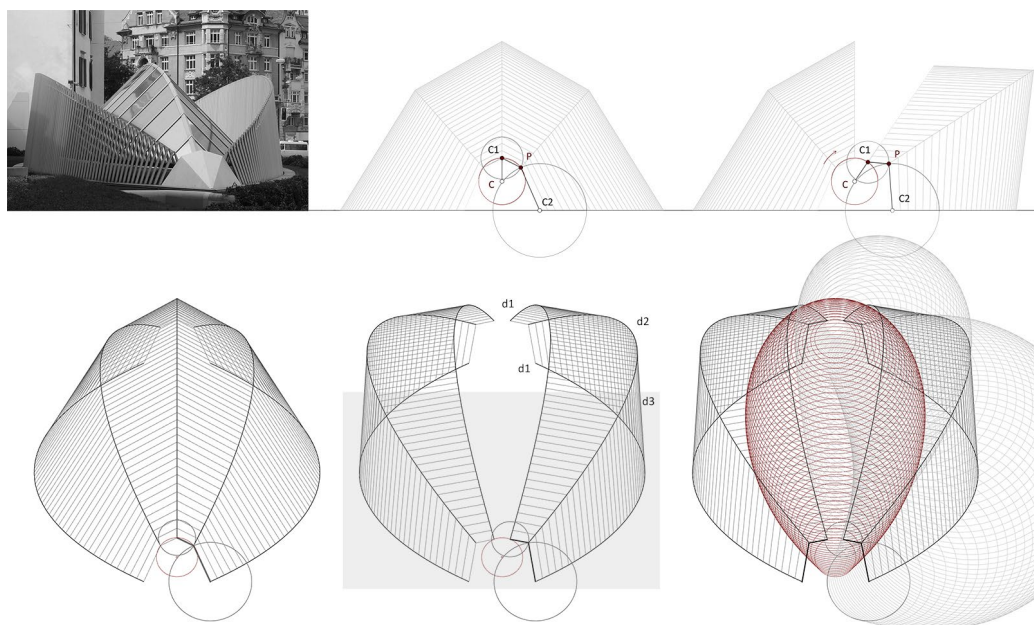
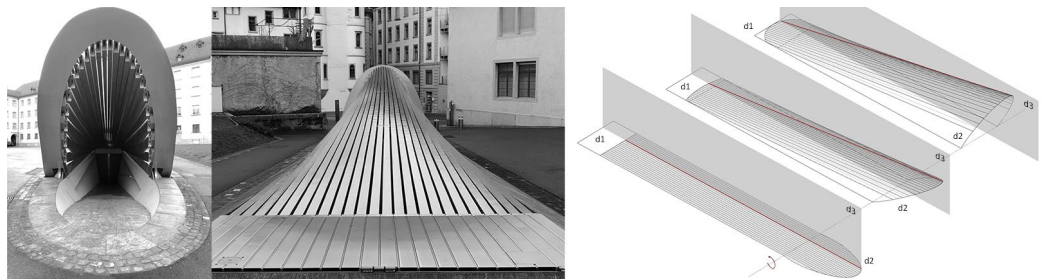



Fig. 9. Ipotesi ricostruttiva dell'algoritmo generativo del movimento della copertura dell'Emergency Service Centre. Elaborazione grafica di A. Natale. In alto a sinistra, foto di Kecko, The Shell (CC BY-NC-SA 2.0), flickr.

Fig. 10. Ipotesi ricostruttiva dell'algoritmo generativo del movimento della palpebra dell'Hemisferic. A sinistra e al centro foto di (vincent desjardins), *España, València*: *El Hemisfèric* (CC BY 2.0), flickr e *El Hemisfèric & el Palacio de las Artes Reina Sofia* (CC BY 2.0), flickr. A destra elaborazione grafica dell'autrice.

Fig. 11. Ipotesi ricostruttiva del movimento delle aste dell'ingresso della Galleria Pfalzkeller. A sinistra e al centro, foto di Rosmarie Voegtli, *Contrast…* (CC BY 2.0), flickr e *Pfalzkeller…* (CC BY 2.0), flickr. A destra, elaborazione grafica di A. Natale.

ipotizzare che il piano direttore sia perpendicolare a una direttrice non visibile rettilinea, che però cambia forma durante il movimento modificandosi in una curva a causa dello scorrimento delle aste, così come cambia forma l'intera superficie durante la sua transizione dalla configurazione chiusa a quella aperta.
Dall'analisi comparativa di questi modelli di architetture cinetiche si può osservare come piccole variazioni dell'algoritmo generativo, unite a lievi cambiamenti di forma e posizione delle direttrici nello spazio, diano vita a un repertorio morfologico nutrito e vario che di progetto in progetto si rinnova.

Conclusioni

Alla ricerca delle ragioni del movimento della forma, questo breve focus ha voluto sottolineare il ruolo della geometria descrittiva nei processi generativi del moto di alcune architetture cinetiche. Strumento regolatore della cinematica della forma, la geometria interviene *ex ante,* in fase di progettazione del moto, argomentando le ragioni della forma alla maniera di un propulsore creativo, motore cinematico senza il quale il movimento non si può neppure immaginare.

Note

[1] La dimostrazione spiega come date tre direttrici sghembe su queste sia possibile costruire infiniti coni appartenenti ad una delle tre e aventi il vertice su un'altra. Questi coni intersecano la terza direttrice in un punto; per questo punto e il vertice passa una delle infinite generatrici della rigata [Monge 1798, pp. 130-131].

[2] Per approfondimenti si vedano gli studi sulle superfici rigate condotti da Federico Fallavollita [Migliari 2019, pp. 153-224].

[3] Nel movimento si modifica anche la curva direttrice condivisa, luogo dei punti nei quali sono incernierate fra loro le aste delle due superfici rigate; la curva in questione da piana diventa sghemba.

[4] Lo stesso algoritmo si riconosce con leggere variazioni nel portale della Sala per concerti dell'Adan Martin Auditorio realizzato a Santa Cruz de Tenerife in Spagna negli anni Novanta.

Crediti

L'analisi geometrico descrittiva delle architetture in movimento è un filone di ricerca che ha trovato riscontro in alcune tesi di laurea triennali seguite dall'autrice dal 2017 ad oggi. Le considerazioni formulate in questo studio risultano anche dalla collaborazione con Alessandra Natale e Antonio Montagnani che, sulla base di modelli teorici di riferimento, hanno condotto censimenti sistematici e realizzato modelli tridimensionali degli algoritmi generativi di una selezione di architetture cinetiche studiate nelle rispettive tesi di laurea. Alessandra Natale, che ha approfondito in particolare il movimento nelle opere di Calatrava, ha realizzato i modelli parametrici dei progetti illustrati nell'immagine di copertina e nelle figg. 8, 9 e 11.

Riferimenti bibliografici

Casale A., Valenti G.M. (2012). *Architettura delle superfici piegate. Le geometrie che muovono gli origami.* Roma: Kappa.

Fano G. (1910). *Lezioni di geometria descrittiva date nel R. Politecnico di Torino*. Torino: Paravia.

Monge G. (1798). *Géométrie descriptive*. Parigi: Baudouin.

Migliari R. (2009). *Geometria descrittiva. Tecniche e applicazioni*, Vol. II. Novara: Città Studi.

Musacchio A. (2009). *Architetture cinetiche. Apparati meccanici ed elettronici nel progetto di architettura*. Milano: Maggioli.

Schumacher M., Vogt M.M., Cordón Krumme L.A. (2020). *New Move: Architecture in Motion - New Dynamic Components and Elements*. Basilea: Birkhauser.

Zuk W., Clark R.H. (1970). *Kinetic architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

<https://www.ahr.co.uk/projects/al-bahr-towers> (consultato il 22 aprile 2023).

<https://www.asif-khan.com/project/sochi-winter-olympics-2014/> (consultato il 5 febbraio 2023).

<https://calatrava.com/> (consultato il 5 febbraio 2023).

<https://www.flickr.com/> (consultato il 22 aprile 2023).

<https://www.heatherwick.com/projects/buildings/bund-finance-centre/> (consultato il 22 aprile 2023).

<https://www.hofmandujardin.nl/cpo-de-hallen-noord/> (consultato il 5 febbraio 2023).

<https://www.makearchitects.com/projects/canary-wharf-kiosks/> (consultato il 5 febbraio 2023).

<https://www.nassia-inglessis.com/works-recent#/disobedience/> (consultato il 5 febbraio 2023).

<https://www.pxfuel.com/free-photos> (consultato il 22 aprile 2023).

<https://www.rvtr.com/projects/resonant-chamber> (consultato il 5 febbraio 2023).

<https://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2> (consultato il 5 febbraio 2023).

<https://www.thedhaus.com/portfolio/the-dynamic-dhaus/> (consultato il 5 febbraio 2023).

Autore
Marta Salvatore, Sapienza Università di Roma, marta.salvatore@uniroma1.it

Per citare questo capitolo: Salvatore Marta (2023). Geometrie in movimento nelle architetture cinetiche/Geometries in Motion in Kinetic Architectures. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (a cura di). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2009-2024.

 Isbn 9788835155119

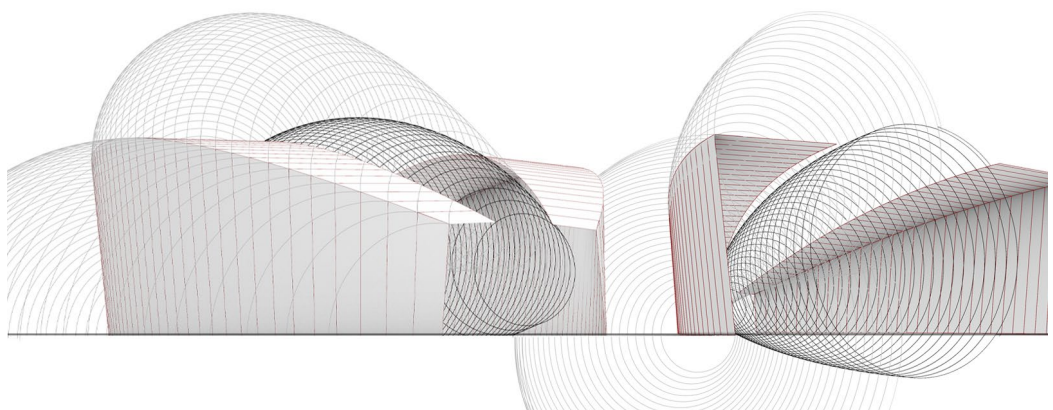
44th International Conference
of Representation Disciplines Teachers
Congress of Unione Italiana per il Disegno

Geometries in Motion in Kinetic Architecture

Marta Salvatore

Abstract

In recent years, contemporary architecture has seen a significant increase in the design and realization of kinetic architecture. The need to modify the form of a building in order to answer to climatic and functional requirements has fuelled experimentation in various types of movement. This variety has led to questioning the role assumed by geometry in the genesis process of generative algorithms, by stimulating research around the reasons for motion based on the geometric analysis of a significant sample in architecture. This critical reading has favoured a classification hypothesis of kinematic motion in architecture, which considers the rigid movements of geometrical surfaces as a sphere proper to the geometry of form. The repertoire of kinetic architectures responding to geometry law is extensive, but for some of them, explored more in depth in this study, the reasons of form become the expression of an architectural language.

Parole chiave
kinetic architecture, ruled surfaces, folded surfaces, architectural geometry, Santiago Calatrava

Algorithms that generate the motion. Graphic elaboration by A. Natale.

doi.org/10.3280/oa-1016-c391

Introduction

In recent years, contemporary architecture witnessed a significant production of kinetic architectures that fed a consistent and variegated repertoire of models. Movement, which generally responds to different climatic and functional needs, is nowadays configured in architecture as an opportunity for morphological experimentation, capable of exploring the places of transition where the mutability of form is in constant evolution [Zuk, Clark 1970; Musacchio 2009; Schumacher, Vogt, Cordón Krumme 2020].
The idea of motion alludes to a concept that can be seductive but also generic and elusive if the laws underlying it are not explicit. The following reflections look at kinematics in architecture through the eyes of geometry, questioning the reasons of motion and the role that geometric properties of form play in the genesis processes of kinetic surfaces.

About the reasons of movement

A comparative analysis of a significant sample of projects realized from the end of the last century to the present day, has led to the identification of a series of movement categories to which the works realized can be referred, with the aim of exploring in orderly fashion the broad repertoire of models that express the kinetic languages of contemporary architecture.
In general, the movement of a kinetic architecture can affect the outer shell of the building or the entire structure, resulting in both cases either elastic or rigid.
Elastic shell movements generally involve the deformation of the external membranes. This deformation can be pneumatic or induced by the movement of the structure, as in the case of the Kinetower skyscraper designed by Kinetura group in 2011 or the One ocean pavilion built by Soma architecture in South Korea in 2012. However, less frequent are the cases in which the elastic movement affects the overall deformation of the structure, which seem to concern mainly pavilions or installations such as the ΑΝΥΠΑΚΟΗ / Disobedience, a kinetic wall realized by Studio Ini in London in 2018.
The repertoire of dynamic architectures that instead respond to a rigid type of movement is broader.
In a rigid motion, i.e., deformation-free, moving entities respond to specific geometry laws, which may be dependent on or independent of the shape of the object. While form-independent movements can generally be performed by translations or rotations of entire structures or parts of them, shape-dependent movements find their *raison d'être* in the properties of special classes of geometric locus surfaces. Folded surfaces and special classes of curved and double-curved surfaces fall into this category. Referring to specific applications, we can recognize rigid movements, obtained by translating individual elements, in the shell of the Fosun Foundation in Shanghai, designed by Heatherwick Studio and Foster + Partners and realized in 2017, where the three overlapping elements translate one onto the other, rotating around the building's perimeter (fig. 1a), and again in Asif Khan's MegaFace pavilion, realized in 2014 in Sochi, Russia, which reproduces the human faces of passers-by by horizontally translating three-dimensional pixels [Schumacher, Vogt, Cordón Krumme 2020, pp. 188-189]. Translations and in particular rotations also affect entire building organisms, such as the Dynamic House project, designed in several prototypes by DHaus Company, whose hinged rooms rotate, reconfiguring the house according to the change of seasons (fig. 1b).
Rigid movements obtained by folding surfaces, concern instead the geometries that move origami [Casale, Valenti 2012] and govern its shape by means of rotation of contiguous flat elements that alter the overall morphology of the shell or the structure. This type of genesis is reflected in projects such as the responsive shell of the Al Bahr Towers in Abu Dhabi, designed by AHR Architects and built in 2012, composed of equilateral triangular elements divided according to their heights into six triangles that, rotating around them, generate openings of varying width (fig. 2); the same geometric pattern is also the basis

Fig. 1. Translation movement of the Fosun Foundation façade (a) and reconstruction of the Dynamic House movement according to the DHaus Company video (b). Graphic elaboration by the author.

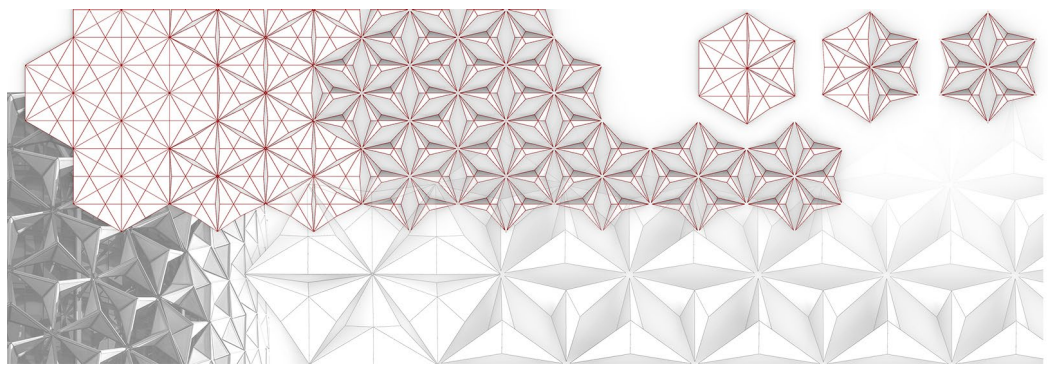



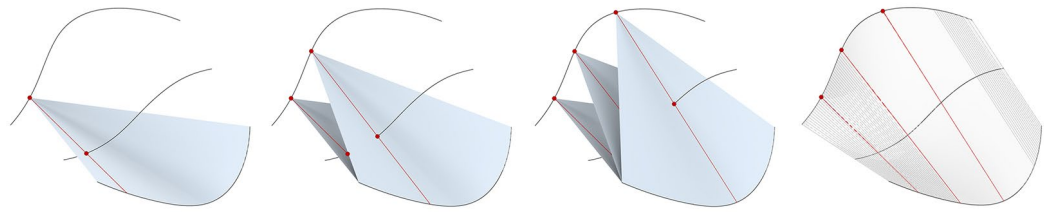
Fig. 2. Reconstruction of the geometries at the basis of the Al Bahr Towers' folded surfaces. Graphic elaboration by the author.

Fig. 3. Reconstruction of the folded surfaces of the Canary Wharf Kiosk. Graphic elaboration by the author.

for the movement of the responsive surfaces of RVTR's Resonant chamber. The surfaces of the retractable terraces of the Cpo De Hallen Noord, realized between 2014 and 2017 by Hofman Dujardin Team, or the shell of the Canary Wharf Kiosk, designed in 2013 by Make Architects, are further different examples of the application of folded surfaces (fig. 3).
As we shall see, the rigid motions that allow a double curvature surface to move or continuously change its shape during the motion find geometric reason in the properties of certain special classes of geometric locus surfaces.

About geometry of movement

In general, a geometric *locus* is the image of all the positions that a geometric entity can assume in space moving according to a certain law. Whole classes of surfaces that satisfy specific conditions are expressions of these *loci*. Among the geometric *loci* capable of moving by generating continuous transformations of form, a prominent role is played by ruled surfaces and, in particular, by ruled surfaces with director plane. Reproduced in discrete form by a finite number of generatrices belonging to them, these surfaces materialize by means of movable shafts capable of responding to different motion requirements.
In the *II Addition à la Géométrie Déscriptive* of 1798, Gaspard Monge describes the genesis of a skewed ruled surface by demonstrating how it always rests on

Fig. 4. Existential demonstration of ruled surfaces given by Gaspard Monge. Graphic elaboration by the author.

three fixed directrix curves, whose shape and dimensions are known [1] (fig. 4). The geometry of these directrices permits identification of four special classes of ruled surfaces, which differ from each other in the kind of directrices: three curves, two curves and one straight line, one curve and two straight lines, three straight lines [2]. This classification of ruled surfaces according to the nature and number of their simplest directrices, which Gino Fano discussed in the early 20th century [Fano 1910, pp. 347-352], can be specialised by considering that the rectilinear directrices of a ruled surfaces can be either proper or improper. This classification feeds a wide repertoire of theoretical reference models, which can be recognized in the numerous applications that these surfaces have found and still find today in architecture. The use of ruled surfaces has in fact accompanied man's building activities since antiquity. The possibility of reproducing a double curved surface in space by the movement of a shaft, simplified their design and construction, making them privileged over the others.
Among the different classes of ruled surfaces, those with a director plane favour the motion. In these surfaces one of the directrices is an improper straight line, and the skewed generatrices, during motion, all remain parallel to this plane. Following the Fano's classification, we can recognize three types of ruled surfaces with a directing plane: those that admit only one improper rectilinear directrix, those that admit two rectilinear directrices, one of which is improper, and those that admit three rectilinear directrices, one of which is improper, a configuration that only corresponds to the case of the hyperbolic paraboloid (fig. 5).

About kinetic ruled architecture

There are many kinetic architectures that employ ruled surfaces, but only in a few cases the geometrical properties of the form become the expression of an architectural language. Therefore, attention has been devoted to the interpretation of ruled geometries underlying Santiago Calatrava's architectural projects realized from the mid-1980s to the present day.
Calatrava's kinetic architectures are generally based on the use of ruled surfaces with a director plane that admit as directrices two curves and one director plane (cylindroids) or one curve, one straight line and one director plane (conoids).
In the design of the wings of the Milwaukee Art Museum roof (1994-2001), we can recognize two symmetrical conoids hinged along the rectilinear directrix d2 (fig. 6). The generatrices, movable shafts of the wings, are all parallel to the directrix d3, director plane of the ruled surface, perpendicular to the hinge. In the case in question, the movement affects the wing as a whole. In fact, the shafts composing it are connected to each other and, during

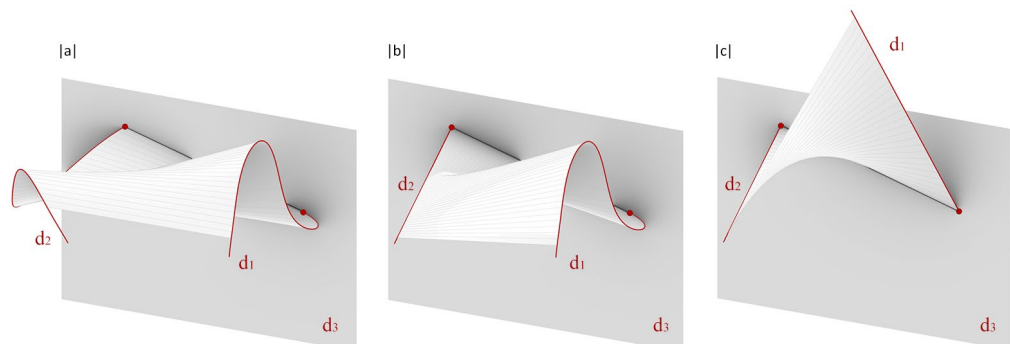



Fig. 5. Ruled surfaces with a director plane that also admit as directrices: two curves (a), one curve and one straight line (b), two straight lines (c). Graphic elaboration by the author.

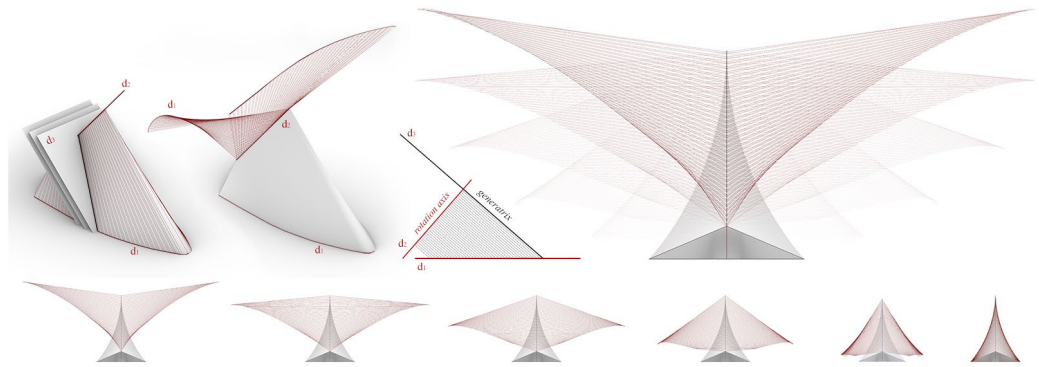
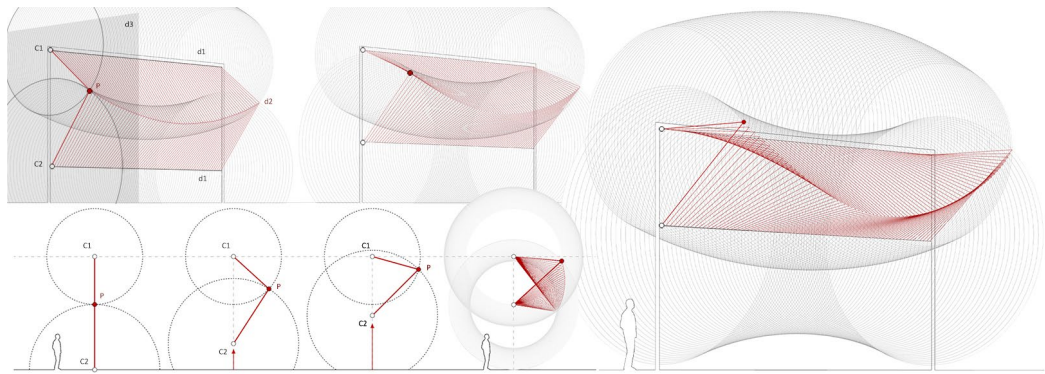



Fig. 6. Reconstruction of generatrices and directrices of the Milwaukee Art Museum's kinetic wings. Graphic elaboration by the author.

motion, the surfaces of the wings retain the same shape they assume in their closed configuration. The perpendicularity between the director plane and the hinge is necessary to allow the movement of each surface in its entirety, without transforming the geometry.
A similar type of movement in which, however, the surface necessarily changes shape during the motion is proposed by Calatrava in the roof of the Florida Polytechnic University (2010-2014). In contrast to the previous one, the ruled surface is supported by two directrix curves and one director plane that cannot be perpendicular to the curved hinge. Therefore, the shafts move independently of each other, forming a surface that constantly changes its geometry during motion (fig. 7).
The first kinetic architecture that Calatrava realized and which can be considered a prototype and a flywheel for later projects, is the Ernstings Warehouse, built in Coesfeld-Latte, Germany, between 1983 and 1985. If the movement of the wings of the Milwaukee Museum concerns the rotation of a single surface, a wing and its symmetry, the design of the Erstings Warehouse instead considers the movement of two surfaces hinged together, inaugurating a model that seems to be declined in different variants in the projects that follow. The kinetic part of the project concerns the closing portals of the warehouse, composed of two conoids with a director plane. In its closed configuration, each portal consists of two flat surfaces constructed from two arrays of contiguous vertical shafts hinged to each other (fig. 8). These are in turn hinged to a fixed beam at the top and a second moveable beam at the bottom, which allows the portal to open and close. When this second beam is lifted, the shafts rotate according to the position of the director plane – perpendicular to the rectilinear directrices – generating two ruled surfaces whose shape constantly changes according to the opening of the portal [3]. Considering a pair of shafts, it is possible to recognize the algorithm that allows the movement of the portal in a pair of circumferences having centres respectively on the fixed beam and on the moving beam, and radius equal to the lengths of the shafts. When the portal opens, the lower beam translates in a vertical direction and the circumferences in question describe, in motion, the geometric locus of all the positions that the shared ends of each pair of shafts may assume in the space [4] (fig. 8).
It is possible to recognize variations of this same generative algorithm in other projects by

Fig. 7. Left, the ruled surfaces of the Milwaukee Art Museum wings, photo by Pxfuel. Right, the wings of the Polytechnic University of Florida, photo by Robert Du Bois, *Florida Polytechnic University* (CC BY-NC-SA 2.0), flickr..

Fig. 8. Reconstructive hypothesis of the generative algorithm of motion enabling the opening of Erstings Warehouse portal. Graphic elaboration by A. Natale.

Calatrava, such as the roof of the Emergency Services Centre in St. Gallen, Switzerland (1988-1998) or the eyelid of the Hemispheric of the City of Arts and Science in Valencia (2005-2009). In these cases, the motion is not produced by a translation but by a rotation around a center, which activates the movement of the first shaft and consequently of the entire structure (figs. 9, 10).
Similar algorithms can still be recognized in the projects of the Plaza de Espagña in Seville (1992-1995) and the access ramp to the Pfalzkeller Gallery in St. Gallen, Switzerland (1997-1999). In the latter case, the kinetic ruled surface opens the entrance portal to the ramp that serves the gallery (fig. 11). As in the case of Erstings Warehouse, the closed configuration is plane, horizontal this time, revealing the surface curvature when the arch of the face rotates for opening the passage. Imagining the closed configuration of the portal, we can hypothesise that the director plane is perpendicular to a non-visible rectilinear directrix which, however, changes shape during movement, modifying itself into a curve due to the sliding of the shafts, just as the entire surface changes shape during its transition from closed to open configuration.
The comparative analysis of these models of kinetic architectures shows how small variations in the generative algorithm, combined with minor variations in the shape and position of the directrices in the space, give rise to a rich and varied morphological repertoire that is renewed from project to project.

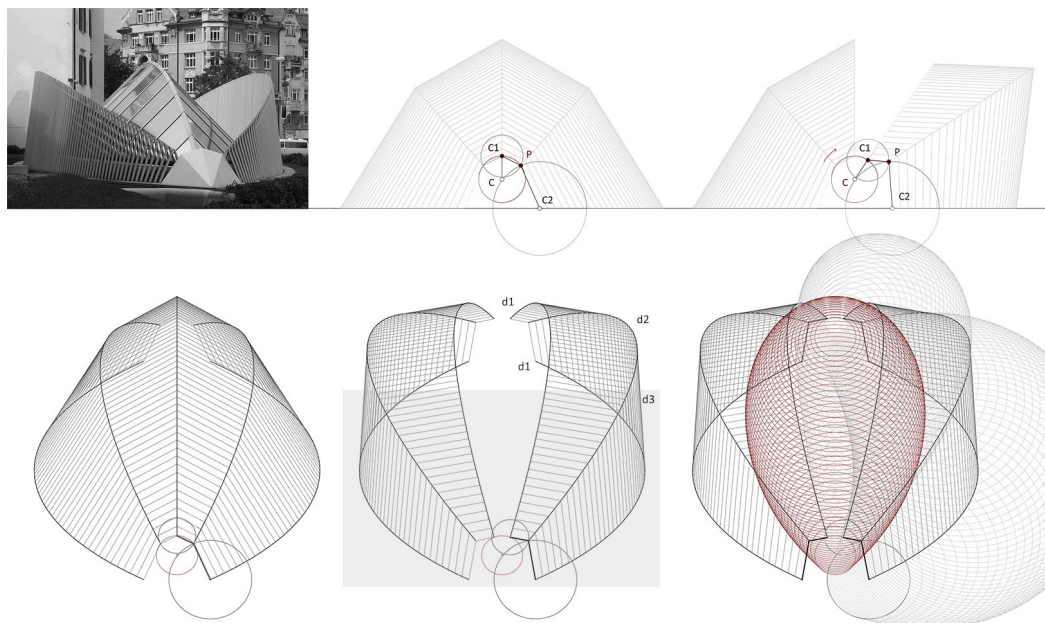
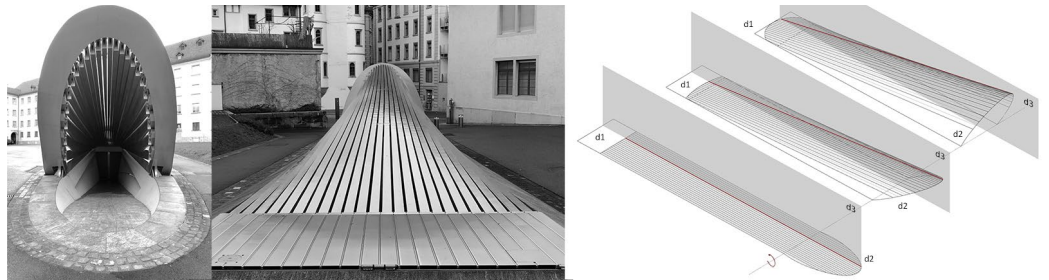



Fig. 9. Reconstructive hypothesis of the generative algorithm of motion of the Emergency Service Centre shell. Graphic elaboration by A. Natale. Top left, photo by Kecko, *The Shell* (CC BY-NC-SA 2.0), flickr..

Fig. 10. Reconstructive hypothesis of the generative algorithm of Hemisferic eyelid movement. Left and centre, photos by ((vincent desjardins), *España, València: El Hemisfèric* (CC BY 2.0), flickr and *El Hemisfèric & el Palacio de las Artes Reina Sofia* (CC BY 2.0), flickr. Right, graphic elaboration by the author.

Fig. 11. Reconstructive hypothesis of the movement of the shafts of the Pfalzkeller Gallery entrance. Left and centre, photos by Rosmarie Voegtli, *Contrast…* (CC BY 2.0), flickr and *Pfalzkeller…* (CC BY 2.0), flickr. Right, graphic elaboration by A. Natale

Conclusions

Researching the reasons for the movement of form, this brief focus has sought to underline the role of descriptive geometry in the generative processes of movement in certain kinetic architectures. As a regulatory tool of the kinematics of form, geometry intervenes *ex ante* in the design phase of movement, inferring the reasons of form as a creative engine, a kinematic motor without which movement cannot even be imagined.

Notes

[1] The demonstration explains that given three skewed directrices it is possible to construct an infinite number of cones belonging to one of them and having its vertex on another. These cones intersect the third directrix at one point; through this point and its vertex passes one of the infinite generatrices of the ruled surfaces [Monge 1798, pp. 130-131].

[2] For more details see the studies on ruled surfaces conducted by Federico Fallavollita [Migliari 2019, pp. 153-224].

[3] During the motion, the shared directrix curve, the *locus* of points where the shafts of the two ruled surfaces are hinged to each other, is also modified; the curve in question from flat becomes skewed.

[4] The same algorithm can be identified with minor variations in the portal of the concert hall of the Adan Martin Auditorio built in Santa Cruz de Tenerife in Spain in the 1990s.

Credits

The geometric descriptive analysis of architectures in motion is a research field that has been addressed in a number of Bachelor's theses supervised by the author from 2017 to today. The considerations formulated in this study also result from a collaboration with Alessandra Natale and Antonio Montagnani, who, on the basis of given theoretical reference models, have conducted systematic investigations and realized three-dimensional models of the generative algorithms of a selection of kinetic architectures studied in their respective theses. Alessandra Natale, who has studied the movement in Calatrava's works, has realized the parametric models of the projects illustrated in the cover image and in figs. 8, 9 and 11.

References

Casale A., Valenti G.M. (2012). *Architettura delle superfici piegate. Le geometrie che muovono gli origami.* Rome: Kappa.

Fano G. (1910). *Lezioni di geometria descrittiva date nel R. Politecnico di Torino*. Turin: Paravia.

Monge G. (1798). *Géométrie descriptive*. Paris: Baudouin.

Migliari R. (2009). *Geometria descrittiva. Tecniche e applicazioni*, Vol. II. Novara: Città Studi Edizioni.

Musacchio A. (2009). *Architetture cinetiche. Apparati meccanici ed elettronici nel progetto di architettura*. Milan: Maggioli.

Schumacher M., Vogt M.M., Cordón Krumme L.A. (2020). *New Move: Architecture in Motion - New Dynamic Components and Elements*. Basel: Birkhauser.

Zuk W., Clark R.H. (1970). *Kinetic architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

<https://www.ahr.co.uk/projects/al-bahr-towers> (accessed 22 April 2023).

<https://www.asif-khan.com/project/sochi-winter-olympics-2014/> (accessed 5 February 2023).

<https://calatrava.com/> (accessed 5 February 2023).

<https://www.flickr.com/> (accessed 22 April 2023).

<https://www.heatherwick.com/projects/buildings/bund-finance-centre/> (accessed 22 April 2023).

<https://www.hofmandujardin.nl/cpo-de-hallen-noord/> (accessed 5 February 2023).

<https://www.makearchitects.com/projects/canary-wharf-kiosks/> (accessed 5 February 2023).

<https://www.nassia-inglessis.com/works-recent#/disobedience/> (accessed 5 February 2023).

<https://www.pxfuel.com/free-photos> (accessed 22 April 2023).

<https://www.rvtr.com/projects/resonant-chamber> (accessed 5 February 2023).

<https://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2> (accessed 5 February 2023).

<https://www.thedhaus.com/portfolio/the-dynamic-dhaus/> (accessed 5 February 2023).

Author
Marta Salvatore, Sapienza Università di Roma, marta.salvatore@uniroma1.it

To cite this chapter: Salvatore Marta (2023). Geometrie in movimento nelle architetture cinetiche/Geometries in Motion in Kinetic Architectures. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (Eds.). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2009-2024.

Isbn 9788835155119